

融合边缘特征与区域特征的高分辨率遥感图像分割方法^①

朱俊杰^② 杜小平 范湘涛 郭华东

(^{*}中国科学院数字地球重点实验室 北京 100094)

(^{**}中国科学院对地观测与数字地球科学中心 北京 100094)

摘要 利用图像的边缘特征和区域特征,设计了一种能实现分割对象边缘精确、对象内部一致性好的分割效果的高分辨率遥感图像分割方法。首先采用 canny 方法获得边缘,并采用形态学方法改善边缘平滑与间断问题;再利用 mean shift 方法对图像进行边缘保持的滤波操作;最后,融合边缘特征与区域特征,利用 mean shift 方法实现图像分割。通过对高分辨率遥感图像进行试验,得到了边缘精确且平滑的区域内部更加一致的分割结果,且在很大程度上消除了欠分割和过分割情况。

关键词 高分辨率,边缘特征,区域特征,融合,分割

0 引言

图像分割历来都是图像处理、图像分析与理解、计算机视觉等相关领域的重要研究内容。目前图像分割已得到广泛应用,例如已应用于工业图像目标检测、遥感图像分析、医学图像处理和视频分析等。对遥感领域而言,图像分割在城市规划、大比例尺地图制图、大型工程建设实时监测、军事侦查与目标定位等方面是必不可少的。图像分割力求分割对象内部一致、边缘规则平滑。

由于遥感影像具有多尺度、多波段、宽覆盖以及地物类型多样等特点^[1],因而图像分割用到的特征包括边缘特征、区域特征(也称光谱特征)、纹理特征、尺度特征和形状特征等。图像分割最先用到的是边缘特征、区域特征和纹理特征,之后是其他特征,由此形成的传统图像分割算法目前就有几百个之多^[2]。虽然图像分割技术的研究有了几十年的发展历史,但至今没有一个统一的体系结构,也没有通用的分割理论^[3]。由于图像对象复杂、外部光照、成像以及噪声等等因素,使得图像对象复杂多变,这些因素就造成了图像分割的困难。Ramos 通过研究认为图像认知有 3 个组成部分:目标对比明显的边缘、内部一致性的区域和图像中的纹理,它们对认知的贡献由强到弱的顺序为变化明显的边缘、

内部一致性的区域、细节纹理^[4]。基于这种背景,本文在研究图像分割存在的具体问题之后,设计了一种融合图像边缘与区域特征,利用 mean shift 算子的图像分割方法,获得了边缘平滑、内部均一的图像分割结果。

1 图像分割的进展及存在的问题

1.1 基于边缘特征的图像分割

相邻地物之间存在局部不连续性,这种不连续性表现为地物具有边缘,这是基于边缘的图像分割方法的依据。但是,由于边缘的模糊或者目标和背景之间的灰度差较小,以及纹理和噪声的存在,基于边缘的图像分割方法存在着边缘间断、漏检、虚假边缘等情况。图1是检测到的边缘与原图像的叠加



图1 图像及其边缘

① 国家自然科学基金(41071274, 61132006)资助项目。

② 男,1974年生,博士,副研究员;研究方向:遥感图像处理与遥感信息提取;联系人,E-mail:jjzhu@ceode.ac.cn
(收稿日期:2011-11-25)

图, 这张图恰恰能够反映基于边缘检测的图像分割的不足。

1.2 基于区域特征的图像分割

基于区域特征的图像分割通常利用的是全局特征或者一定范围的局部区域特征, 它利用相邻像素的一致性, 表现出对象内部像素相同或者非常相近。这种方法能够在一定程度上消除噪声的影响, 能够产生闭合边缘的区域, 而且还具有原理简单、可以不约定类别数目和适用于多波段影像等优点。但是基于区域的图像分割存在以下两个问题:

(1) 边缘处的分割经常不正确, 甚至将边缘分割成区域对象, 这是其一直未能解决的问题。例如图 2 中黑色线段为分割对象的边界, 白色线段表示 canny 算子检测到的边缘。图 2 中的椭圆包含了一个分割对象, 这个分割对象包围着白色边缘, 可以发现这个分割对象的像素分别属于两类地物, 因此这个基于区域特征的分割对象显然是不正确的。

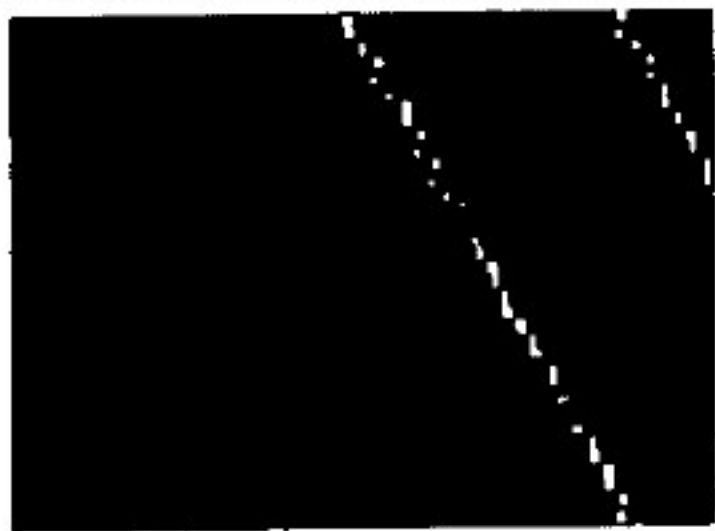


图 2 分割图像与边缘叠加

(2) 基于区域的分割方法由于受噪声的影响, 所以分割得到的目标边界很不平滑。如图 2 中的分割对象的边界很不规则、不平滑, 存在大量毛刺, 有时与地物实际情况不符。

1.3 基于边缘特征与区域特征融合的图像分割

基于图像边缘的分割方法对图像边界具有较好的局域化效果, 但不具有全局分割能力, 而基于区域特征的分割方法的边缘定位的能力不够。虽然边缘特征和区域特征两种信息融合的图像分割在本质上不能使图像分割的病态问题变成良态, 但是它利用了图像目标更多的信息, 从理论上讲能够得到更好的分割结果。边缘信息与区域信息融合的图像分割可以分为两种类型, 一种为两种方法串行, 另一种为两种方法并行。

(1) 边缘特征与区域特征串行的分割方法。这种方法也分两种情况。一种是先做边缘检测, 再进

行区域分割, 也就是边缘约束区域分割。边缘检测的目的是为区域分割提供约束和支持, 使区域增长时必须受边缘的限制, 不能越过边界。比如 Mueller 在图像区域增长时还考虑到了边缘闭合^[6], 但是其仅仅针对农田的提取, 如果要进行更广泛的图像分割还需要进一步研究。另一种是先进进行区域分割, 再进行边缘检测, 通过边缘闭合得到分割结果。比如 Pavlidis 的算法仅仅是改善了分割对象的聚合, 没有改进分割对象的边缘和内部一致性, 导致边缘不平滑^[6]; Steudel 和 Glesner 在 1999 年进行了相关的研究, 其分割对象边缘精度还是有些不足^[7]。Rotem 等人也研究了融合区域区域特征与边缘特征的图像分割方法^[8], 其边缘是通过合并图像的纹理、颜色和亮度三种特征的最大后验概率获得的, 而且与设定的概率值相比较来确定边缘的存在与否, 这是一个非常新颖的方法, 但是其获得的边缘没有进行平滑操作, 这是其一点不足。

(2) 边缘特征与区域特征并行的分割方法。它是先独立不干扰的提取边缘信息和区域信息, 之后两种信息相互补充来修正和优化分割结果, 产生更精确的分割结果^[9], 因为实现较复杂, 对这种思路的探讨相对较少。Kermad 和 Chehdi 利用这种类型的分割方法进行图像分割后, 再利用反馈机制对前面的分割进一步优化, 这种增加反馈机制的图像分割结果更好一些, 但是算法方案比较复杂, 还需要深入探讨^[10]。

官鹏等人指出图像分割方面今后研究的问题包括探索新的多尺度多层次分割算法, 将有关信息或约束条件加入分割过程中^[11]。Munoz 等分析了边缘与区域融合的图像分割技术后指出, 今后图像分割研究的重点之一是集成多种算法与多种特征来提高分割结果^[2]。因此, 本文通过对高分辨率图像进行分析, 提出了一种融合图像边缘与区域特征的图像分割方法, 在边缘提取方面采用了抗噪能力强的 canny 算子来提取边缘, 并利用形态学进行图像边缘平滑与间断连接; 在基于 mean shift 进行图像分割时融合了边缘特征, 从而获得了边缘更平滑准确、内部更一致的图像分割结果。

2 边缘与区域融合的图像分割方法

2.1 边缘检测的方法

canny 算子是一个优秀的边缘检测算子, 它事实上已经成为检验其它边缘检测方法优劣的标准,

其它方法的优劣通常与 canny 算子对比来确定。它依据信噪比准则、定位精度准则、单边相应准则 3 个边缘优化准则提出最佳边缘检测算子。

(1) 信噪比准则:

$$SNR = \frac{\left| \int_{-w}^w G(-x)f(x)dx \right|}{n_0 \sqrt{\int_{-w}^w f^2(x)dx}} \quad (1)$$

其中 $f(x)$ 为滤波器的脉冲响应, $G(x)$ 为边缘, n_0 为高斯噪声的均方根, 这个原则的含义是: 信噪比越高, 边缘提取质量就越好。

(2) 定位精度准则:

$$Localization = \frac{1}{\sqrt{E[x_0^2]}} = \frac{\left| \int_{-w}^w G'(-x)f'(x)dx \right|}{n_0 \sqrt{\int_{-w}^w f'^2(x)dx}} \quad (2)$$

这个原则的含义是: 比值越大, 边缘定位精度越高。

(3) 单边相应准则:

$x_{max}(f) = 2x_x(f) = kW$, 其中 $x_{max}(f)$ 表示两个相邻最大值之间的距离, k 为小于 1 的系数, $x_x(f)$ 为零交叉点之间的平均距离, 其计算公式为

$$x_x(f) = \pi \left(\frac{\int_{-w}^w f'^2(x)dx}{\int_{-w}^w f''^2(x)dx} \right) \quad (3)$$

这个原则的含义是: 单边缘只有一个响应。

canny 算子是非常优秀的边缘检测算法, 该算子在理论上非常完美, 但实现起来非常困难, 比如它的单边准则会造成交叉边缘在交叉处间断。canny 算子的边缘检测三原则是算法实现的依据, 由于在算法实现工艺方面不同, 结果也会有很大的差别, 如果对提取得到的边缘进行形态学的膨胀和腐蚀操作以及边缘细化与平滑操作^[12], 就可以得到更加理想的图像边缘。

2.2 基于区域特征的图像分割方法

mean shift 方法是一个优秀的图像分析算法, 其含义是一个迭代的步骤, 先计算当前点相对附近点像素均值的偏移量, 并移动该点到其偏移均值, 然后以此点位置为新的起始点, 继续移动, 直到满足一定的结束条件。它是由 Fukunaga 等人于 1975 年首先提出来的^[13], 在后来的应用中, Cheng 对基本的

mean shift 算法做了推广^[14]; 定义了一族核函数, 设定了一个权重系数, 从而扩展了 mean shift 的适用范围。之后, Comaniciu 等人将 mean shift 算法应用于图像平滑和图像分割取得了不错的效果^[15], 此后在图像处理和视频分析等相关领域出现了研究 mean shift 算法的热潮。本研究采用 mean shift 方法作为区域增长方法, 并利用了扩展的 mean shift 算子:

$$M_h(x) = \frac{\sum_{i=1}^n G\left(\frac{x_i - x}{h}\right) w(x_i) x_i}{\sum_{i=1}^n G\left(\frac{x_i - x}{h}\right) w(x_i)} - x \quad (4)$$

其中, $G(x)$ 表示单位核函数, $w(x)$ 表示权重函数, n 表示小窗口内的像素个数。

利用核函数 K_{h_s, h_c} 计算点 x 的空间信息和色彩 (或灰度) 分布情况, K_{h_s, h_c} 形式如下:

$$K_{h_s, h_c} = \frac{C}{h_s^2 h_c^p} k\left(\left\| \frac{x'}{h_s} \right\|^2\right) k\left(\left\| \frac{x''}{h_c} \right\|^2\right) \quad (5)$$

其中, 图像的空间信息和色彩 (或灰度等) 信息, 组成一个 $p+2$ 维的向量 $x = (x', x'')$, x' 表示网格点的坐标, x'' 表示该网格点上 p 维向量特征。可以认为 $k(x)$ 为高斯函数, 其中 h_s 和 h_c 控制着平滑的解析度, C 是归一化常数。

mean shift 算子在图像滤波、计算机视觉跟踪等具体应用方面的研究非常热门, 其中一个方面是自适应的核函数带宽选择^[16,17], 本文没有针对核函数带宽进行专门的研究, 而是针对边缘与区域融合的图像分割进行相关的研究。

2.3 边缘与区域融合的图像分割方法

为了得到边缘精度更高、区域内部更均一的分割对象, 本文采用了边缘特征与区域特征融合的图像分割方法, 在图像分割过程中, 采用了先提取边缘, 再利用边缘约束区域增长的方式实现图像分割, 这个过程分为 4 个步骤:

(1) 基于 canny 算子的边缘检测, 并利用形态学方法进行平滑处理和消除由于单边相应准则造成的边缘间断, 再去除小的虚假边缘, 得到图像边缘。

(2) 基于 mean shift 方法进行图像平滑滤波, 在进行参数设置时尽量选择小的参数, 避免大参数造成图像边缘模糊。

(3) 边缘和区域特征融合的 mean shift 算子图像分割方法, 用边缘特征约束区域增长, 区域增长不能跨越图像边缘。

(4) 分割对象合并, 将小的分割对象合并到大

的分割对象之中,在合并过程中,其原则是没有边缘间隔的相邻对象才能够合并。

3 图像分割实验

3.1 图像及其 mean shift 滤波

实验采用了海地太子港 2010 年 1 月 13 日 Geo-Eye-1 卫星影像的红、绿、蓝 3 个多光谱波段,其分辨率为 1.65m,如图 3 所示。采用 mean shift 算子进行滤波时,设置滤波带宽为 5,滤波结果如图 4 所示。

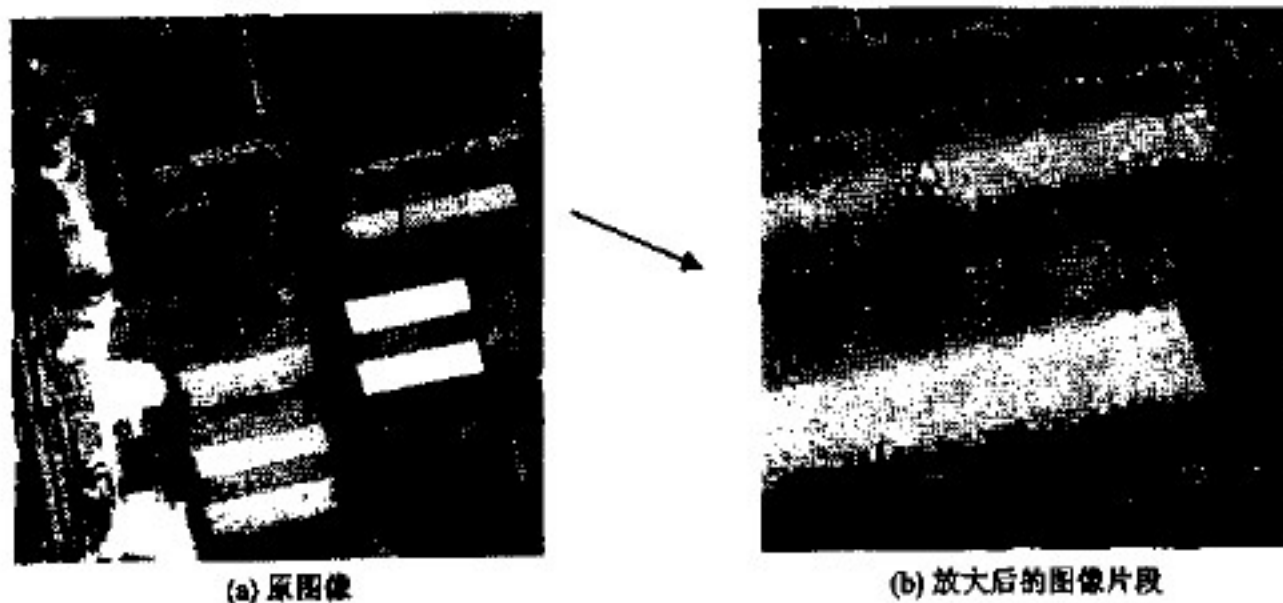


图 3 多光谱图像

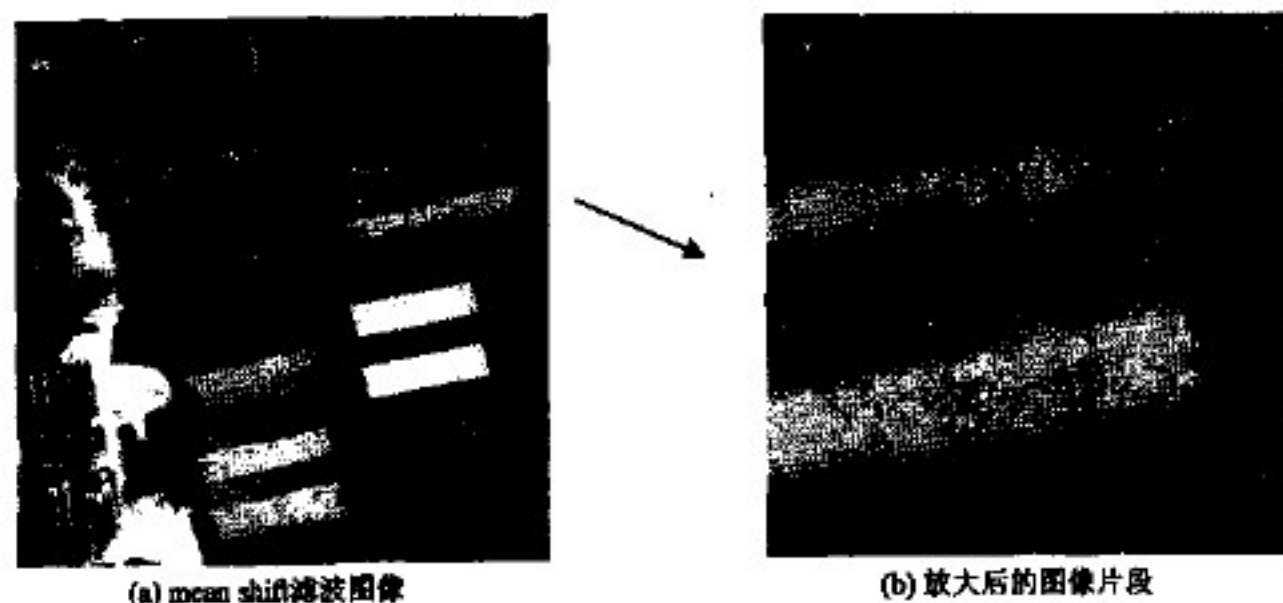


图 4 多光谱图像的 mean shift 滤波结果

对比图 3(a) 和图 4(a),从视觉上几乎看不出差别,即经过 mean shift 滤波后得到的滤波图像能够很好地保持边缘特征而不模糊。但是将图像放大,如切片图 3(b) 和图 4(b) 所示,可以发现滤波图像在边缘有效保持的情况下平滑了图像,这说明 mean shift 算法在保持边缘锐化的情况下,有效降低了图像噪声。

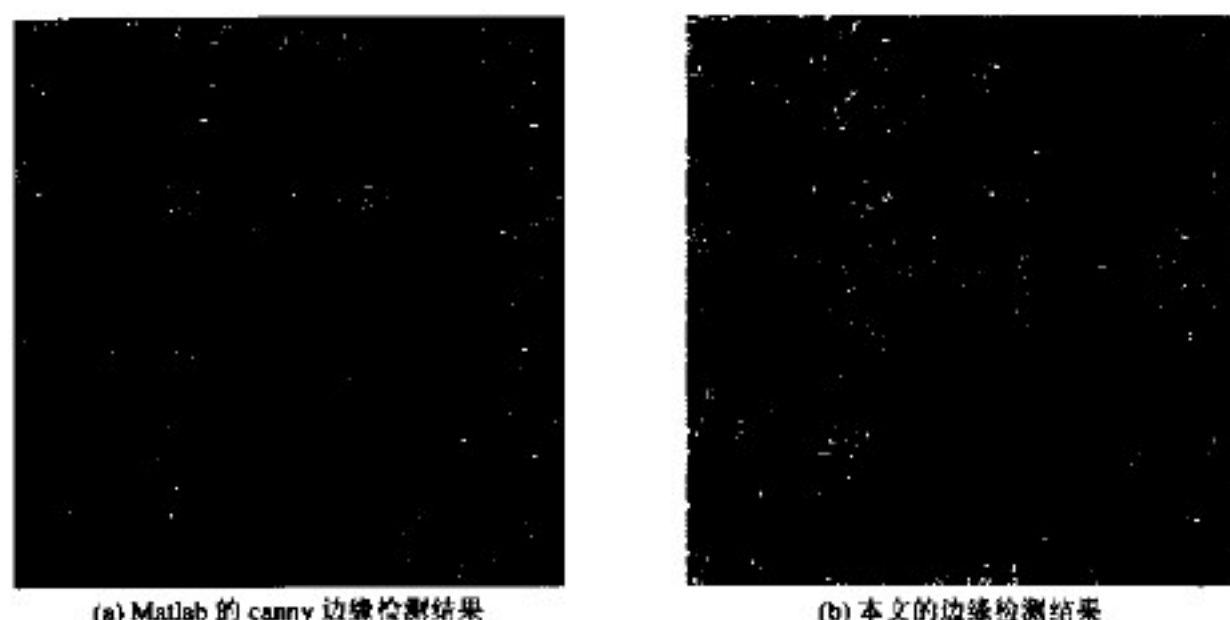
3.2 图像边缘检测

canny 算法的实现版本中,目前公认最好的就是 Matlab 软件中的实现方法,如图 5(a) 所示。分析图 5(a) 就可以看出其边缘平滑且单边。不过其缺点也十分明显,通过观察可以发现它存在众多的、与事实不符的边缘间断现象。而本文在实现 canny 边

缘检测方面采用形态学的方法进行边缘平滑与链接操作,得到更完美的图像边缘,如经过连接并去除小边缘之后的图 5(b) 所示。从图 5(b) 可以看出图像平滑,而且间断明显变少了。

3.3 图像分割

本文利用 canny 算子检测图像边缘,再融合图像的边缘特征和区域特征进行图像分割。这里的边缘采用图 5(a) 中的边缘,基于区域特征的像素合并时的 mean shift 算法的阈值设置为 6,小对象(或像素)合并规则为小于 40 个像素并且分割对象(或像素)拓扑相邻且相连通(分割对象拓扑相邻且相连通指两个相邻的分割对象没有完全被边缘所分开,也就是它们相邻处没有边缘)。图像分割结果



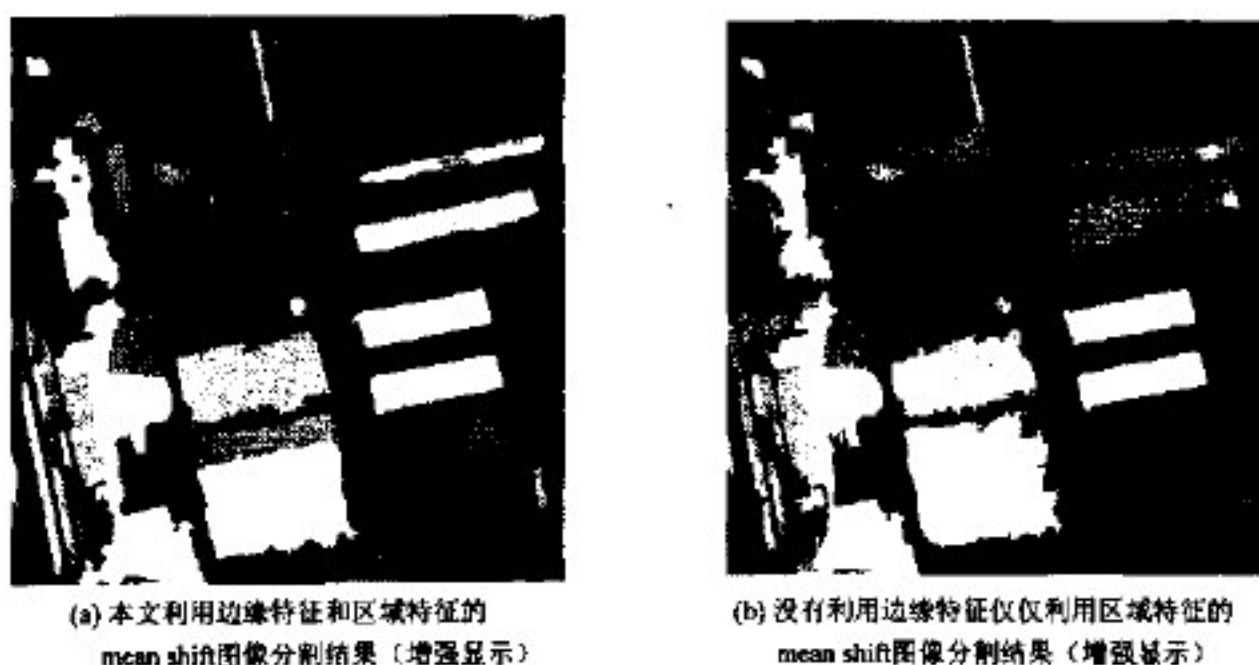
(a) Matlab 的 canny 边缘检测结果

(b) 本文的边缘检测结果

图5 本文的边缘检测结果和 Matlab 的边缘检测结果

如图6(a)所示。为了对比本方法的效果,采用传统的没有利用图像边缘特征,而仅仅利用图像的区域特征实现 mean shift 图像分割,采用的参数为像素

合并阈值为6,小对象合并规则为小于40个像素且分割对象拓扑相邻,分割结果如图6(b)所示:



(a) 本文利用边缘特征和区域特征的 mean shift 图像分割结果 (增强显示)

(b) 没有利用边缘特征仅仅利用区域特征的 mean shift 图像分割结果 (增强显示)

图6 图像分割结果对比

3.4 图像分割结果分析

图像分割评价方法有多种,目视对比分析是一种定性的判断方法,很多相关的文献^[5,6,18]都采用这种方法来说明分割效果的优劣。通过对比图6的(a)和(b),可以发现:(1)融合边缘特征与区域特征的 mean shift 分割方法比仅仅采用区域特征的 mean shift 分割方法确实要好,分割对象表现出边缘平滑、完整和更加规则的特点,这与地物的实际情况更符合。而没有边缘特征参与的图像分割结果表现出对象边缘不规则,具有毛边现象,这与地物实际情况是不相符合的。(2)融合边缘与区域特征的 mean shift 分割方法存在较少的过分割和欠分割情况,而没有边缘特征参与的图像分割结果存在着较多的过分割和欠分割情况,根本原因是基于区域的图像分割方

法还是受到了噪声的干扰,而 canny 算子具有很强的抗噪能力,所以相比之下,融合边缘特征与区域特征的图像分割方法是更理想的分割方法。

对分割结果的定量评价,还没有公认的、行之有效的方法,一些评价方法有自身的不足之处,只是在一定程度上客观地反映了分割效果的好坏,有些图像分类的文献采用总体分类精度、用户分类精度和 Kappa 系数来计算分类结果,这些参数也可以用于描述图像分割的效果^[19]。本文采用了对分割对象进行手工分类,再在原图像中手工选择样本区域,并进行类别归属,最后,将这些样本与算法分割结果进行对比评价。本文在原图像上手动选择了建筑物、植被和地表三类样本,如图7所示。对每一个分割对象进行分类之后,再统计分割中错误类别的像素

个数,统计误分割结果如表 1 所示。通过这样的对比发现,融合边缘与区域两类特征的 mean shift 分割方法获得的分割对象的误分像素少,而仅仅采用区域特征的 mean shift 分割方法得到分割结果有更



图 7 图像分割评价样本

表 1 误分类像素的统计表 (单位: 像素)

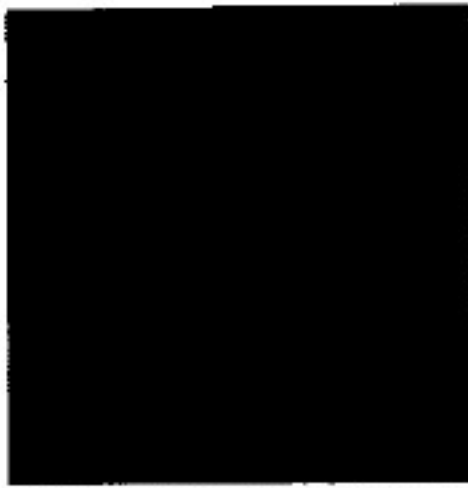
分割方法	建筑物	植被	地面
边缘与区域特征的 mean shift 分割	111	98	22
无边缘, 仅仅区域特征参与的 mean shift 分割	417	337	73
误分比例	1 : 3.76	1 : 3.43	1 : 3.31

多的误分像素。这说明了融合边缘与区域两类特征的分割方法比仅仅采用区域特征的图像分割方法效果要好很多。

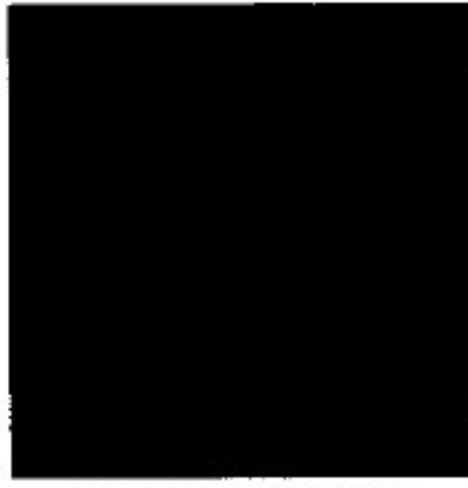
本方法不仅对多光谱图像能够得到很好的分割效果,而且对单波段、单极化的 SAR 图像也能获得很好的分割效果,采用 TerraSAR 的 1m HH 极化数据进行分割,如图 8 所示。对比分割结果可以看出融合边缘特征与区域特征的分割结果能够更好地忠实于原地物。



(a) TerraSAR 原图像



(b) 融合边缘与区域特征的分割结果



(c) 基于区域特征的分割结果

图 8 SAR 图像及分割结果

4 结 论

本研究首先针对 canny 算子实现方面存在相交边缘处间断的不足,采用形态学的方法进行了平滑和连接等改进操作,其次在分割时利用图像的边缘特征与区域特征,利用平滑且定位精确的边缘约束区域增长,使得图像分割结果避免了区域过度合并和边缘不平滑的缺点,得到边缘平滑且内部均一的分割结果。通过实验可以发现,边缘特征融合区域特征的分割方法确实能够提高高分辨率遥感图像分割效果,并且减少了过分割和欠分割情况的产生。

但是,参数设置影响图像分割结果是众多分割方法的共性,这种设置对某些区域效果很好,但是对图像中的另一些区域必然产生不理想的结果,这也

说明了研究更加符合人脑智能的分割方法还需要走很长的路,这也是一个关键的研究内容。

参考文献

[1] 周成虎, 骆剑承. 高分辨率卫星遥感影像地学计算. 北京: 科学出版社, 2009. 1
[2] Munoz X, Freixenet J, Cufi X, et al. Strategies for image segmentation combining region and boundary information. *Pattern Recognition Letters*, 2003, 24(1-3): 375-392
[3] 章毓晋. 图像分割. 北京: 清华大学出版社, 2001
[4] Ramos M G, Hemami S S, Tamburro M A. Psychovisually-based multiresolution image segmentation. In: *Proceedings of the 1997 International Conference on Image Processing*, Washington, DC, USA. 1997. 66-69
[5] Mueller M, Segl K, Kaufmann H. Edge and region-based segmentation technique for the extraction of large, man-made objects in high-resolution satellite imagery. *Pattern*

- Recognition*, 2004, 37(8):1619-1628
- [6] Pavlidis T, Liow Y. Integrating region growing and edge detection. *IEEE Transactions On Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, 12(3):225-233
 - [7] Steudel A, Glesner M. Fuzzy segmented image coding using Orthonormal bases and derivative chain coding. *Pattern Recognition*, 1999, 32(11):1827-1841
 - [8] Xuan J H, Adah T, Wang Y. Segmentation of magnetic resonance brain image integrating region growing and edge detection. In: *Proceedings of the International Conference on Image Processing*, Washington, DC, USA, 1995. 544-547
 - [9] Rotem O, Greenspan H, Goldberger J. Combining region and edge cues for image segmentation in a probabilistic gaussian mixture framework. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Minneapolis, USA, 2007:1-8
 - [10] Kernad C D, Chehdi K. Automatic Image Segmentation System through Iterative Edge-Region Operation. *Image and Vision Computing*, 2002, 20(8):541-555
 - [11] 宫鹏, 黎夏, 徐冰. 高分辨率影像解译理论与应用方法中的一些研究问题. *遥感学报*, 2006, 10(1):1-5
 - [12] Lam L, Lee S W, Suen C Y. Thinning methodologies-a comprehensive survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(9):869-885
 - [13] Fukunaga K, Hosteller L D. The estimation of the gradient of a density function, with applications in pattern recognition. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1975, 21(1):32-40
 - [14] Cheng Y. Mean shift, mode seeking, and clustering. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995, 17(8):790-799
 - [15] Comaniciu D, Meer P. Mean shift: a robust approach toward feature space analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(5):603-619
 - [16] 覃剑, 曾孝平, 李勇明. 基于边界力的 Mean-Shift 核窗宽自适应算法. *软件学报*, 2009, 20(7):1726-1734
 - [17] Zhu S. Algorithm of target tracking based on mean shift with adaptive bandwidth of kernel function. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(8):12-16
 - [18] 何宁, 张朋. 基于边缘和区域信息相结合的变分水平集图像分割方法. *电子学报*, 2009, 37(10):2215-2219
 - [19] Campos N, Lawrence R, McGlynn B, et al. Effects of LiDAR-Quickbird fusion on object-oriented classification of mountain resort development. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2010, 4:043556

Segmentation of high-resolution remote sensing images based on fusing edge and region features

Zhu Junjie, Du Xiaoping, Fan Xiangtao, Guo Huadong

(Key Laboratory of Digital Earth Science, Center for Earth Observation and Digital Earth, CAS, Beijing 100094)

Abstract

To obtain a better result of segmenting high-resolution remote sensing imagery, the paper presents a useful segmentation method to achieve segmentation objects with high edge precision and good internal consistency by use of edge and regional features. It is briefly described below: Firstly, the smooth edges are obtained by the canny algorithm and the edge gaps are connected with morphologic methods. Secondly, the image is filtered by a mean shift algorithm, which is a kind of edge-preserving filter. Finally, the fusion of the edge and regional features is adopted by the mean shift algorithm to segment the remote sensing image and obtain the segmentation objects which have the smooth edges and uniform regions. The results of the contrastive experiments on a high-resolution image show that the mean shift segmentation by adopting the edge and spectral features is better than the method adopting only the spectral feature.

Key words: high resolution, edge feature, regional feature, fusion, segmentation